

ВПЛИВ ЗОВНІШНЬОЇ ТУРБУЛЕНТНОСТІ НА ГАЗОВУ ЗАВІСУ З ТРАНШЕЇ

В. А. Коваленко¹, І. І. Борисов²

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

Проаналізовано дані експерименту по встановленні залежності між ефективністю плівкового охолодження і зовнішньою турбулентністю потоку.

Ключові слова: турбулентність, плівкове охолодження, ефективність

Вступ

Газові турбіни знайшли широке застосування в авіації, суднобудуванні, енергетиці, а також в приводах компресорів в газотранспортній системі. Вони характеризуються широким діапазоном потужності (від 2 кВт до 375 МВт), малими габаритами, високою маневреністю, надійністю в експлуатації. Коefіцієнткорисної дії (ККД) сучасних енергетичних газотурбінних установок простого циклу в діапазоні зміни електричної потужності від 10 МВт до 375 МВт становить 35 – 40%. Підвищення ККД і потужності газових турбін простого циклу досягається за рахунок зростання температури газу перед турбіною і підвищення ступеня стиснення повітря в компресорі. Сьогодні в кращих потужних енергетичних газотурбінних установках (350 МВт і більше) вхідні температура газу становить близько 1500 °C, в високотемпературних авіаційних ГТД – 1650 – 1700 °C і в ВМД механічного приводу – 1350 – 1400 °C.

Оскільки зростання температури газу обмежене допустимою температурою працездатності матеріалу лопаток газових турбін, яка для кращих сплавів становить 1000–1100 °C, то в сучасних лопатках поряд з теплозахисними покриттями широко застосовуються внутрішнє і зовнішнє (плівкове) охолодження.

1. Види охолодження

Незважаючи на використання нових більш жароміцних матеріалів, впровадження технологій монокристалічного лиття та лиття з спрямованою кристалізацією, а також застосування захисних покриттів, досягнення таких високих температур газу (до 1600 °C) стало можливим в основному за рахунок вдосконалення систем охолодження лопаток. Як показано на рис. 1, темп зростання температури газу, що омиває РЛ першого ступеня, істотно перевищує темп зростання допустимої температури для використовуваного матеріалу лопатки.

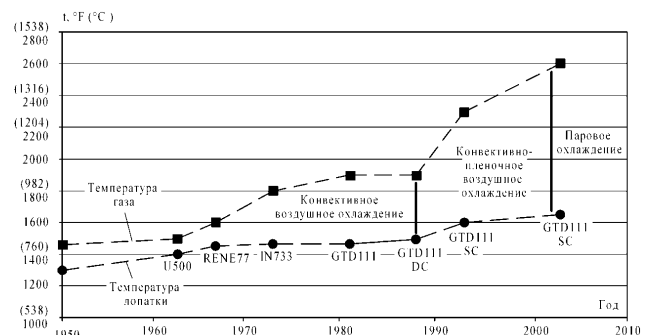


Рис. 1. Збільшення температури газу перед турбіною і допустимої температури РЛ

Незважаючи на розробки замкнутих і напівзамкнутих систем охолодження з альтернативними холодоагентами, найбільш вивченим з яких є парове охолодження, їх застосування не знайшло широкого попиту через ускладнення конструкції і меншу надійність в експлуатації. У зв'язку з цим, в абсолютній більшості сучасних ГТД для охолодження соплових і робочих лопаток застосовується повітряна відкрита система охолодження. Ця система порівняно проста по конструкції і надійна в експлуатації, вона є по суті єдиною системою, що використовується для охолодження лопаток газових турбін.

Серед сучасних методів плівкового охолодження найбільш ефективним є подача охолоджувача через фасонні отвори, однак проводиться пошук і інших перспективних рішень, які є більш простими технологічно. Одним з таких рішень є подача вторинного повітря у отвори, які розташовані в траншеї. Такий спосіб дозволяє охолоджувачу перед виходом на поверхню розподілитись по ширині, і в результаті ефективність газової зависи суттєво зростає. В реальних умовах роботи лопаток на характеристики газової зависи впливає ряд факторів, одним із них є зовнішня турбулентність потоку, рівень якої складає 4 – 12%. Метою даної роботи є вивчення

закономірностей впливу зовнішньої турбулентності на ефективність газової завіси при вдуві вторинного повітря через однорядну систему похилих циліндричних отворів, які розташовані в траншеї.

2. Ефективність плівкового охолодження

Одна з перших експериментальних робіт по дослідженню ефективності плівкового охолодження при подачі вторинного повітря через ряд похилих отворів в траншеї була виконана для двох варіантів відносної глибини траншеї: глибокої, $h/d = 3$ і дрібної, $h/d = 0,43$. Уже ці дослідження показали, що дрібна траншея є більш перспективним варіантом для практичного застосування: збільшення ефективності плівкового охолодження склало 50...75% у порівнянні з базовим варіантом однорядної системи отворів без траншеї, що детальніше показано у [1].

На думку автора, випуск охолоджувача на дно траншеї захищає його від безпосереднього проникнення в основний потік (гарячий газ) і взаємодії з ним. При цьому важливо, щоб стінка траншеї, в яку вдається струмінь, розташовувалася якомога ближче до крайки отвору. Ця стінка працює як перешкода, що змушує частину охолоджувача розтікатися в поперечному напрямку всередині траншеї до виходу на захищає зовнішню поверхню. Вона також послаблює або руйнує характерні для струменів охолоджувача вихрові структури, підсмоктуватиметься основний потік до поверхні.

Вивчається плівкове охолодження як на плоскій поверхні, так і на моделях лопаток апаратів, в широкому діапазоні зміни геометричних і режимних параметрів. Прикордонний шар перед траншеєю у всіх роботах був турбулентним, що характерно для умов обтікання профілів лопаток. При аналізі та узагальненні даних по ефективності і теплообміну координата x відраховується від нижньої по потоку кромки траншеї.

Досліджувалася ефективність плівкового охолодження на плоскій поверхні при відносному кроці розташування отворів $t/d = 3$, кути нахилу отворів до поверхні, що захищається $\alpha = 30 \dots 350$, в діапазоні зміни відносної глибини траншеї $0,4 \leq h/d \leq 1$. Осі отворів були орієнтовані вздовж основного потоку, відносна ширина траншеї h/d змінювалася від 2 (отвори «вписані» в траншею при $\alpha = 30^\circ$) до 3,5; інтервал зміни відносної поздовжньої координати становив $0 \leq x/d \leq 10$. Параметр вдуву в експериментах знаходився в діапазоні $0,5 \leq m \leq 2,0$. У цих роботах були досліджені варіанти 1–5 і 11, 12, що відображено на рис. 2. Для порівняння була досліджена також базова конфігурація у вигляді ряду отворів без траншеї. Ставлення щільності охолоджувача і основного повітря становило 1,07.

Ряд робіт присвячений дослідженню траншейної конфігурації на моделях профілів лопаток турбін. В дослідженні варіанти 1–11, які показані на рис. 2, а також, для порівняння, варіант з отворами без траншеї. Отвори вдуву розташовувалися на поверхні розрідження (спинці) лопатки, на опуклій поверхні,

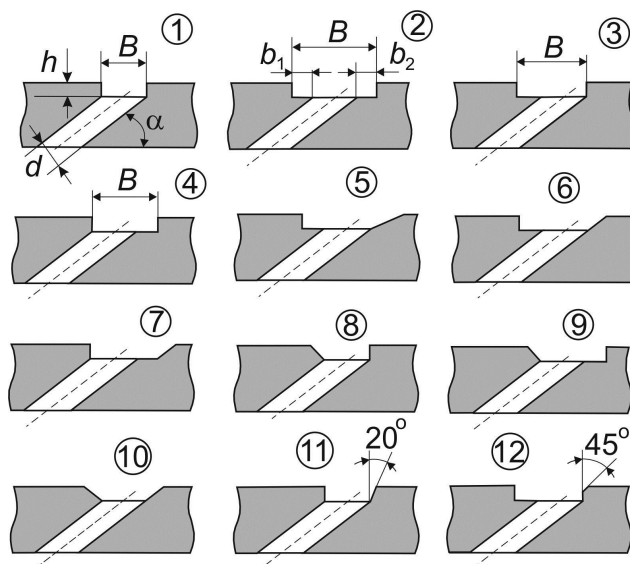


Рис. 2. Варіанти досліджених конфігурацій траншей

що також впливає на ефективність плівкового охолодження. Параметр вдуву змінювався в діапазоні $0,3 \leq m \leq 1,5$, кут нахилу отворів до поверхні, що захищається $\alpha = 30^\circ$, відносний крок $t/d = 2,78$. Відносна глибина траншеї змінювалася в діапазоні $0,5 \leq h/d \leq 1,0$, розміри b_1 і b_2 (варіант 2 на рис. 2) становили $0,5 d$ (основний варіант), а також $2 d$ і $1,5 d$; отвори розташовувалися на центральній лінії траншеї.

Як відзначають автори всіх експериментальних досліджень, при траншейному плівковому охолодженні зі збільшенням параметра вдуву до 2–2,5 ефективність охолодження зростає, на відміну від варіанту без траншеї, для якого максимум ефективності досягається при $m \approx 0,5$. Таким чином, використання траншеї забезпечує високу ефективність плівкового охолодження при великих параметрах вдуву, за даними [2] навіть при $m = 4$. Експерименти показали, що найкращими з досліджених варіантів, як з точки зору ефективності, так і з точки зору рівномірного покриття поверхні, виявилися варіанти з вертикальною задньою стінкою, за умови, що розмір площадки b_2 не перевищує $0,5d$, в іншому випадку ефективність істотно знижується. Таким чином, при виборі геометрії критичним фактором є близькість вихідного отвору до стінки траншеї вниз по потоку. При широкій траншеї і великих параметрах вдуву основний потік проникає в траншею і змішується з охолоджувачем. Експерименти показали, що при $m = 1,4$ система отворів, розташованих у вузькій траншеї, по середньої ефективності плівкового охолодження в діапазоні $0 < x/d < 30$, перевершує традиційну систему отворів без траншеї в 3 рази, а система отворів в широкій траншеї - всього лише на 65%. У ряді досліджень було встановлено, що оптимальна відносна глибина траншеї складає величину $h/d = 0,75$. В цьому випадку ефективність траншейного плівкового охолодження лише незначно поступається фасонним отворами з таким же відносним кроком [1].

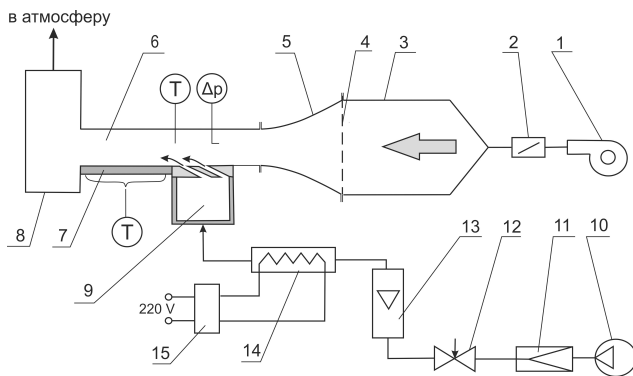


Рис. 3. Схема експериментальної установки. 1 – вентилятор; 2 – поворотний затвор; 3 – ресивер; 4 – турбулізуюча решітка; 5 – сопло Вітошинського; 6 – робоча ділянка; 7 – адіабатна пластина; 8 – заспокоююча ємність; 9 – ділянка вдуву вторинного повітря; 10 – компресор; 11 – фільтр-регулятор; 12 – вентиль; 13 – ротаметр; 14 – електричний нагрівач вторинного повітря; 15 – джерело живлення постійного струму.

3. Експериментальна установка

При проведенні експериментів з дослідження плівкового охолодження використовувалась установка, схема якої представлена на рис. 3. Установка представляє собою аеродинамічну трубу відкритого типу, яка працює від відцентрового вентилятора ВВД-5 (поз. 1 на рис. 3). Повітря від вентилятора подається через поворотний затвор 2 в ресивер 4, потім на вхід робочої ділянки (експериментальний канал) 6. Для забезпечення рівномірності поля швидкості на вході в робочу ділянку на виході із ресивера встановлювались сітка 3 та сопло 5, спроектоване по профілю Вітошинського. Вхідний переріз сопла складає $400 \times 300 \text{ мм}^2$, а вихідний – $294 \times 34 \text{ мм}^2$. Після робочої ділянки повітряний потік надходив у ємність 8, яка слугує для гасіння пульсацій.

Для дослідження ефективності плівкового охолодження використовувався зворотній напрям теплового потоку: основний потік холодний, а вторинний – підігрітий. Вторинний потік від індивідуального компресора 10 через регулюючий вентиль 11, фільтр-регулятор 12, ротаметр 13 та електронагрівач 14 подавався у експериментальний канал через теплоізовану ділянку вдуву 9. Канал має прямокутний переріз, який відповідає вихідному перерізу сопла Вітошинського ($294 \times 34 \text{ мм}^2$). Нижня стінка каналу містить пластину вдуву з оргскла, з системою отворів для подачі охолоджувача, та адіабатну пластину (поз. 7) з азбоцементу ($\lambda = 0.17 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$).

Для генерації турбулентності використовувалась решітка (перфорована пластина) з відносним проходним перерізом 17,3%. Її було встановлено на вході в сопло Вітошинського, в цьому випадку на виході із сопла забезпечується ізотропна турбулентність. Рівень турбулентності потоку в робочій ділянці перед отворами вдуву вимірювався термоанемометром постійної температури, і в даних експериментах складав близько 7%. Без решітки вхідна турбулентність потоку складала близько 1%.

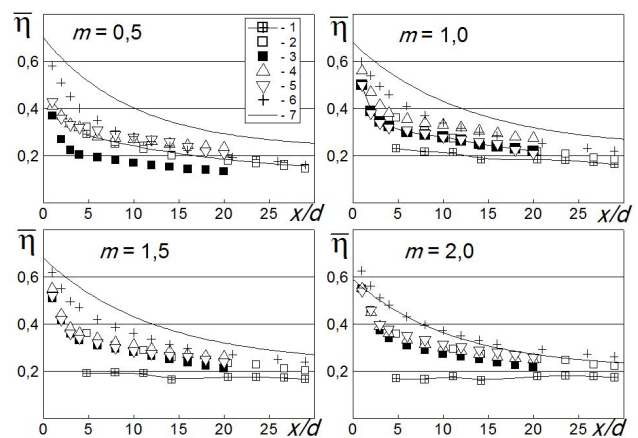


Рис. 4. Осереднена в поперечному напрямку ефективність плівкового охолодження при різних параметрах вдуву: 1, 2 – плоска поверхня, отвори без траншеї і в траншеї за даними авторів [2], $t = 3d$, $h/d = 0.75$; 3 – 5 – плоска поверхня, отвори з кроком $t = 3d$ в траншеї за даними: 3 – $B = 2d$, $h = 0.75d$; 4 – $B = 3d$, $h = 0.75d$; 5 – $B = 2d$, $h = 0.5d$; 6 – Отвір в траншеї для охолодження моделі спинки лопатки $t/d = 2.77$, $B = 2d$, $h = 0.5d$; 7 – фасонні отвори, $t/d = 3$ [1]

В адіабатну пластину врівень з поверхнею вмонтовані хромель-алюмелеві термопари, розташовані у повздовжньому напрямі на одній лінії з постійним по довжині шагом (10 мм). В установці передбачена можливість переміщення адіабатної пластини поперек потоку для визначення локальних значень ефективності плівкового охолодження.

В експериментах вимірювались наступні параметри: температура, швидкісний напір та статичний тиск основного потоку в перетині вдуву (тобто на вході в робочу ділянку), витрата та температура повітря, що вдувається, температура адіабатної поверхні у дев'яти точках по довжині пластини з кроком 10 мм.

Для визначення температури повітря, яке вдувається, термопари встановлювались у двох різних отворах вдуву безпосередньо перед виходом назовні. Показання цих термопар у процесі експериментів були практично ідентичними (відмінність не перевищувала 1.5%).

У якості термоелектродів використовувався хромель-алюмелевий дріт діаметром 0.1 мм.

4. Вплив зовнішньої турбулентності

Вплив ступеня турбулентності основного потоку на осереднену в поперечному напрямку ефективність траншейного плівкового охолодження вивчено досить слабо. Є результати чисельних досліджень для вдуву охолоджувача через один ряд фасонних отворів в траншеї [3] до значень параметра вдуву $m = 1.3$. Краї отвору були «вписані» в траншею. У порівнянні з варіантом фасонних отворів без траншеї, чутливість ефективності охолодження до ступеня турбулентності основного (зовнішнього) потоку помітно знижується. При значеннях параметра вдуву $m > 1.0$ турбулентність підвищує ефективність

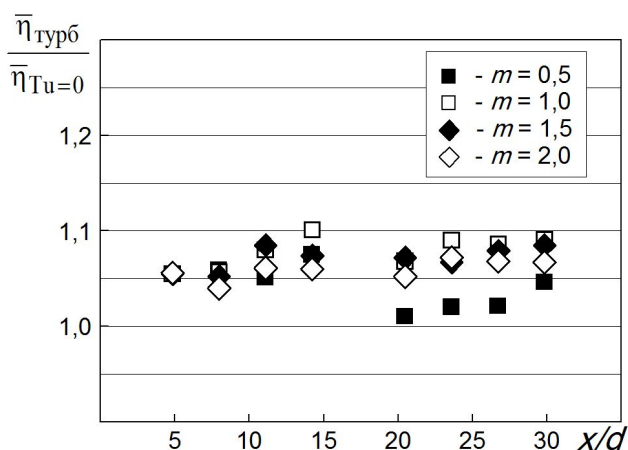


Рис. 5. Вплив ступеня турбулентності основного потоку ($Tu = 7\%$) на ефективність плівкового охолодження системою отворів в траншеї.

охолодження на початковій ділянці. Можливо, це відбувається внаслідок додаткової дисперсії струменів, яка сприяє притиснення охолоджувача до поверхні [4].

Дані щодо впливу ступеня турбулентності основного потоку ($Tu = 7\%$) на ефективність траншейного плівкового охолодження, отримані авторами ([4]), показані на рис. 5 у вигляді залежності ефективностей для турбулізованого і нетурбулізованого основного потоку. Як видно з рисунка, зовнішня турбулентність при використанні даної конфігурації траншеї незначно, на 5–8%, збільшує ефективність охолодження, на відміну від інших схем плівкового охолодження з безвідривним обтіканням поверхні

плівкою охолоджувача – тангенціальної щілини і фасонних отворів – для яких турбулізація потоку призводить до зниження ефективності.

Висновки

Проаналізовано дані експерименту по встановленні залежності між ефективністю плівкового охолодження і зовнішньою турбулентністю потоку. Отримані дані для різних параметрів вдуву та типів траншей.

Перелік використаних джерел

1. A. Dhungel. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches // Journal of Turbomachinery. — 2009. — no. 8. — P. 13.
2. Y. Lu. Film cooling from a row of holes embedded in transverse slots // ASME Turbo Expo. — 2005. — no. 9. — P. 8.
3. S. Baheri. The effect of turbulence intensity on film cooling of gas turbine blade from trenched shaped holes // ASME Turbo Expo. — 2008. — no. 6. — P. 10.
4. Пленочное охлаждение плоской поверхности однородной системой наклонных отверстий в траншее: влияние внешней турбулентности и ускорения потока / Халатов, А. А., Борисов, И. И., Коваленко, А. С. и др. // Теплофизика и аэромеханика. — 2013. — Т. 20, № 6. — С. 731–737.